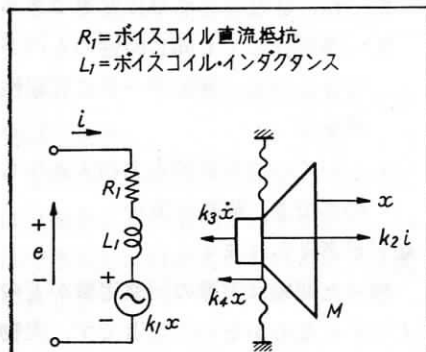
▲第3図―LCRによる等価回路

ダミー・スピーカはLCRでできる

佐藤　康夫

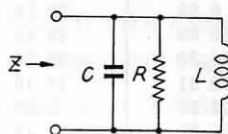
はじめに

本誌昨年12月号にダミー・スピーカを使ってパワー・アンプの特性を測定する試みが発表され，あらためて抵抗負荷との差の大きいのに驚かされたのは筆者ばかりではないと思います．抵抗負荷で測った特性が良いだけでは駄目だ，ということは従来からもいわれていたことですが，誰もスピーカ負荷での特性を測った人がいないのは，測定中の騒音公害を考えれば当然といえましょう．それをわざわざ音の出ないスピーカを特注してまでこの問題に挑戦された編集部の熱意にはまったく敬服いたします．今後はこの種の測定法が一般に普及されるべきだと思いますが，何分にもダミー・スピーカを入手することは誰にでもできることではありません．

第1図―スピーカの等価回路と振動系のモデル

そこで，なんとか受動素子だけでスピーカのインピーダンスをシミュレートできないものかと思い計算してみたところ，一応使えそうな案ができましたので発表させていただきます．

みなさんのなかには，スピーカのように起電力を持った負荷を受動素子だけで表現できるはずがないと考えられる方があるかも知れませんが，元来スピーカの逆起電力というのは外部からエネルギーが与えられて始めて発生するものであり，入力がなくなった後は可動部の質量のもつ運動エネルギーとダンパやエッジに貯えられた位置のエネルギーが電気エネルギーに変換されて発生するものです．したがって，インダクタンスや静電容量のようにエネルギーを一時貯えることができる素子を使えば，電気系だけでシミュレートできるわけです．

スピーカの動作解析

さて実際にどのような回路を使えばよいかを考える前に，スピーカの動作を解析する必要があります．これを詳しくやるときりがありませんし，スピーカに関してはまったくしろうとの私にできるはずもありません．そこで最も簡単なモデルを設定し，話をピストン・モーションの領域に限ることにします．

第2図―第1図中の電圧源の等価回路

$$Z=\frac{1}{Cs+\frac{1}{R_1}+\frac{1}{Ls}}$$

まず**第1図**を見てください．図の左半分は電気系の等価回路，右側は機械系をモデル化したものです．図中R_1はボイスコイルの直流抵抗，L_1はボイスコイルを固定して測ったインダクタンス，電圧源はボイスコイルに発生する逆起電力を示しています．この逆起電力の大きさはボイスコイルの速度に比例しますから，ボイスコイルの平衡の位置からの変位をx，比例定数をk_1とすると，$k_1\,dx/dt$となります．また，その極性は図中の矢印の向きに電流が流れたとき，ボイスコイルの動く方向をxの正の方向とすると，図に示した向きになります．したがって，ボイスコイルの入力電圧と電流の間には次式が成り立ちます．

$$e=R_1i+L_1\frac{di}{dt}+k_1\frac{dx}{dt}\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

上式の両辺をラプラス変換すると，

$$E(S)=(R_1+L_1S)I(S)+k_1SX(S)\cdots\cdots\cdots(2)$$

となります．

一方機械系では，ボイスコイルの発生する力はその電流に比例するので，k_2i，ダンパによる復元力はフックの法則に従うとしてk_4xとします．その他に速度に比例する抵抗力が空気の粘性その他によって生じますから，その合計をk_3xとします．可動部の質量をMとすれば，運動方程式は，

$$M\frac{d^2x}{dt^2}k_2i-k_3\frac{dx}{dt}-k_4x\cdots\cdots\cdots(3)$$

となります．これもラプラス変換してXについて解くと，

$$X(S)=\frac{k_2}{MS^2+k_3S+k_4}\ I(S)\cdots\cdots(4)$$

となります．これを(2)式に代入して両辺をI(S)で割ると，スピーカのインピーダンス関数として，

$$Z(S)=R_1+L_1S+\frac{k_1\ k_2S}{MS^2+k_3S+k_4} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

が求まります．また(2)式と(4)式とから I(S)を消去すれば，スピーカの伝達関数が求まりますが，今回は，はぶきます．後は(5)式のインピーダンスを合成すれば良いわけですが，始めの2項は問題ないので，第3項だけをとり出して考えます．

$$\frac{k_1\ k_2\ S}{MS^2+k_3S+k_4}$$

の分母分子をk_1k_2Sで割ると，

$$\frac{1}{\dfrac{MS}{k_1k_2}+\dfrac{k_3}{k_1k_2}+\dfrac{k_4}{k_1\ k_2S}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

となりますが，これはk_1k_2/MS，k_1k_2/k_3，k_1k_2S/k_4という3つのインピーダンスを並列に接続したものと考えることができます．したがって，**第2図**のようなC，R，Lの並列回路で，

$$C=\frac{M}{k_1k_2},\quad R=\frac{k_1k_2}{k_3},$$

$$L=\frac{k_1k_2}{k_4} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

の関係があれば，その合成インピーダンスは(6)式に一致します．

念のために，単位を調べておきますと，MKS単位系を使って，

$$[k_1]=\frac{\text{ボルト・秒}}{\text{メートル}}$$

$$[k_2]=\frac{\text{ニュートン}}{\text{アンペア}}$$

$$[k_3]=\frac{\text{ニュートン・秒}}{\text{メートル}}$$

$$[k_4]=\frac{\text{ニュートン}}{\text{メートル}}$$

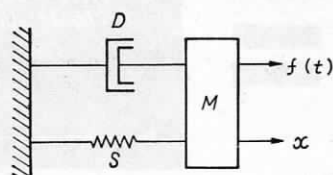
となりますから，

$$\left[\frac{M}{k_1k_2}\right]=\frac{\text{キログラム・メートル・アンペア}}{\text{ボルト・秒・ニュートン}}$$

$$=\frac{\text{秒}}{\text{オーム}}=\text{ファラッド}$$

$$\left[\frac{k_1k_2}{k_3}\right]$$

$$=\frac{\text{ボルト・秒・ニュートン・メートル}}{\text{メートル・アンペア・ニュートン・秒}}$$

$$=\text{オーム}$$

$$M\frac{dv}{dt}+Dv+S\int vdt=f(t) \qquad v=\frac{dx}{dt}$$

第4図—簡単な機械系の例

$$L\frac{di}{dt}+Ri+S\int idt=e(t) \qquad C\frac{de}{dt}+Ge+\Gamma\int edt=i(t)$$

第5図—第4図についての2つの等価回路

$$\left[\frac{k_1k_2}{k_4}\right]$$

$$=\frac{\text{ボルト・秒・ニュートン・メートル}}{\text{メートル・アンペア・ニュートン}}$$

$$=\text{オーム・秒}=\text{ヘンリー}$$

となって，間違いないことがわかります．

結局，スピーカの等価回路として，**第3図**が得られたわけです．低域共振周波数f_0は，

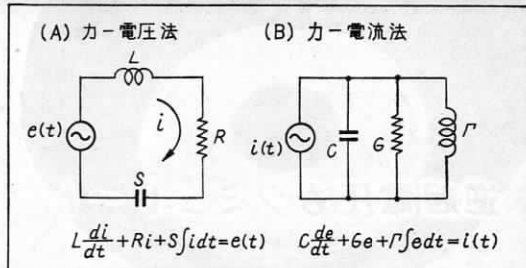
$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

できまり，共振のQはR_2で加減できますから，バフルを変えたときの影響も簡単にシミュレートできます．

LCRダミー・スピーカの特徴と問題点

第3図の回路がどの程度まで真実に近いかは，モデルの設定に当って立てた仮定が正しいかどうかにかかってい

f (Hz)	|Z| (Ω)	φ (°)
10	7.74	10.37
20	8.63	20.76
30	10.89	29.48
40	16.30	28.76
45	20.31	19.10
50	22.51	2.39
55	20.81	−13.48
60	17.68	−22.69
70	13.23	−27.44
80	11.01	−25.66
100	9.13	−19.20
120	8.39	−13.41
150	7.93	− 6.65
200	7.69	1.54
250	7.69	7.77
300	7.78	12.94
400	8.10	21.45
600	9.10	34.26
800	10.36	43.55
1 K	11.80	50.50
2 K	20.14	68.13
3 K	29.15	75.09
5 K	47.65	80.94
10K	94.51	85.45

第1表—アンプの動特性測定用ダミーSPをLCRで近似させたときの特性

ます．ボイスコイルの振幅が大きくなり過ぎると，k_1～k_4はもはや定数でなくなりますが，アンプの動特性を調べる目的からは，スピーカの動作領域を直線範囲に限定しても差しつかえないと思います．またコーンが分割振動し始める高域ではこのような集中定数系で表わすことはできなくなりますが，分割振動の影響が出ないのはコーンのないダミー・スピーカでも同様です．それに高域では(5)式のうち始めの2項が主としてきいてきますから，分割振動による誤差はそんなに大きくないと思われます．一方，この方式の特長として，

1. まったく音が出ない
2. f_0，Qなどを簡単に変更できる
3. 誰が作っても同じ特性のものができるので，測定データに客観性がある
4. いくらでも許容入力の大きなものができ，価格が安い

などが考えられます．

残った問題は実際の回路定数がどのくらいになるかということです．実物のスピーカを測定して(7)式から計算すればいちばん良いわけですが，スピーカをこわさなければ測定できない量もありますので，その方はメーカーさんにお願いしたいと思います．

今回は，コンピュータで特性を計算しながらカット・アンド・トライで定数を求めることにしました．**第3図**中の定数は，例として12月号のダミー・スピーカのインピーダンス特性を，あまり半端な値を使わないでほぼ近似できるように求めた数値です．このときのインピーダンス特性が**第1表**です．これをみても，この程度のダミー負荷でも十分スピーカ ↗